



**mgr inż. Joanna
Kijowska-Oberc**

Zajmuje się wpływem zmian klimatu na jakość nasion roślin drzewiastych i ich kiełkowanie. Do jej zainteresowań naukowych należą także mechanizmy kształtujące formy adaptacji drzew do warunków suszy i upałów, takie jak epigenetyka i plastyczność fenotypowa. Pracuje w Instytucie Dendrologii PAN w Pracowni Biochemii Nasion. joberc@man.poznan.pl

DOPÓKI SUSZA ICH NIE ROZŁĄCZY

Trudno wyobrazić sobie Ziemię bez majestatycznych drzew i wszechobecnych krzewów. Jednak nie wszyscy wiemy, że za ich sukcesem stoją wszechobecne, choć często niezauważalne grzyby. Tym, co ściśle łączy te dwie grupy organizmów, jest życiodajna woda. To właśnie dzięki niej grzyby i drzewa pozostają już od setek milionów lat w nierozzerwalnej przyjaźni. Jak susza może wpływać na drzewa i tworzony przez nie najstarszy ewolucyjnie związek symbiotyczny?



Joanna Kijowska-Oberc
Ewelina Ratajczak
Marcin Pietras

Institut Dendrologii
 Polskiej Akademii Nauk w Kórniku

Od wielu lat najodleglejsza historia życia na Ziemi budzi wielkie zainteresowanie ludzi nauki. Jedyną możliwością sięgania do najwcześniejszych dziejów organizmów żywych są badania skamielin, które wraz z nowoczesnymi metodami badań izotopowych opartych na pomiarze czasu rozpadu pozwalają na datowanie takich prastarych znalezisk. Do niedawna uważano, że historia ewolucji roślin i grzybów jest z sobą ściśle związana. Zarówno szczątki kopalne pierwszych roślin, jak i najstarsze skamieliny grzybów były datowane na ten sam okres, między 450 a 500 mln lat temu. Wszystko zmieniło się w 2019 roku, po odkryciu, które wpłynęło na postrzeganie historii życia naszej planety.

Wielkie wyjście z wody

Wyobraźmy sobie świat, który mógł istnieć 500 mln lat temu, w okresie geologicznym zwanym kambrem. Pustynie surowych skał wyłaniających się z bezkresnych oceanów. Na próżno szukać w tym kambryjskim świecie roślin czy najmniejszych zwierząt, choćby podobnych do nam znanych. Jednak świat ten nie jest całkowicie jałowy. Na powierzchni skał rozwija się cienka warstwa mikroorganizmów, tworzona głównie przez bakterie, a także jednokomórkowe glony i strzępki grzybów. Dzisiaj podobne aglomeraty, składające się z wielu różnych mikrobów, nazywamy biofilmem. Najprawdopodobniej właśnie w takim biofilmie po raz pierwszy doszło do współdziałania roślin i grzybów, po raz pierwszy zawiązała się między nimi symbioza, która pozwoliła roślinom skolonizować lądy.

Wróćmy do czasów współczesnych, do 2019 roku i odkrycia, które zmieniło spojrzenie na historię życia i ewolucji na Ziemi. Wtedy to zespół pod kierownictwem Corentin Loron z Uniwersytetu w Liège przedstawił światu swoje odkrycie. W skałach arktycznej części Kanady znaleźli oni skamieliny prągrzyba, których wiek oszacowano na blisko miliard lat. Odkrycie to pokazało jednoznacznie, że grzyby pojawiły się na lądzie o wiele wcześniej, niż dotychczas uważano. Dzięki swoim zdolnościom do syntezy wielu enzymów przygotowywały ląd na pojawienie się roślin. Przez miliony lat mozolnie rozkładały lite, surowe skały, w ten sposób uwalniając związane w nich minerały do środowiska. Można powiedzieć, że grzyby w bardzo wczesnym okresie obecności roślin na lą-

dzie funkcjonalnie odgrywały rolę korzeni, których te nie miały. Sukces ewolucyjny roślin wynika więc nie tylko z możliwości wykorzystania energii słonecznej do związania sześciu cząsteczek dwutlenku węgla i sześciu cząsteczek wody w procesie fotosyntezy, lecz także z później nawiązanej symbiozy z grzybami, dzięki której uzyskiwały dostęp do minerałów i możliwość aktywnego pobierania wody. Współdziałanie roślin i grzybów pozwoliło z jednej strony na wielki ewolucyjny skok, jakim było uniezależnienie się od środowiska wodnego, z drugiej zaś wystawiło rośliny na wiele zagrożeń wynikających ze wzrostu na lądzie. W czasie milionów lat ewolucji niekorzystne i zmienne warunki środowisk lądowych spowodowały pojawienie się wielu przystosowań, zarówno u roślin, jak i grzybów, które pozwoliły im przetrwać do dziś.

Pomocna strzępka grzybni

Stale i nieprzerwane współistnienie drzew i grzybów pozwala obydwu grupom organizmów na przeżycie w warunkach niedoboru wody. Jedną z funkcji symbiozy mykoryzowej (relacji między roślinami a grzybami opartej na obopólnej korzyści) jest ochrona korzeni drzew przez grzyby w niesprzyjających warunkach takich jak susza. Warstwa grzybni (nazywana mufką) oplata drobne korzenie roślin, zabezpieczając je przed wyschnięciem. Połączona z systemem korzeniowym grzybni snuje się kilometrami, przerastając glebę, przez co zwiększa powierzchnię chłonną korzeni kilka tysięcy razy. W przeciwieństwie do komórek roślinnych grzybni ma o wiele większą odporność na wysychanie. W warunkach skrajnej suszy strzępki grzybów potrafią się skupić w tzw. sklerocjach, kulistych przetrwalnikach, wewnątrz których mogą następnie przeczekać w glebie okres największej suszy. W przypadku długotrwałego niedoboru wody możemy obserwować zmianę garnituru grzybów mykoryzowych kolonizujących korzenie drzew z gatunków wrażliwych na suszę na gatunki odporne, takie jak grzyb *Cenococcum geophilum*, którego mykoryzy są znajdowane na korzeniach drzew rosnących w ekstremalnie suchych ekosystemach. Co za tym idzie,



MARCIN PIETRAS



dr hab.
Ewelina Ratajczak

Jest specjalistką w dziedzinie fizjologii i biochemii nasion, zatrudnioną w Instytucie Dendrologii PAN. Zawodowo zajmuje się molekularnymi podstawami starzenia się nasion drzewiastych. Bada związki regulujące stan redoks w nasionach, poszukując potencjalnych markerów ich żywotności.
 eratajcz@man.poznan.pl



dr Marcin Pietras

Jest adiunktem w Pracowni Badań Związków Symbiotycznych Instytutu Dendrologii PAN. Jego zainteresowania badawcze skupiają się wokół zagadnień związanych z ochroną przyrody, w szczególności występowaniem i rozprzestrzenianiem obcych gatunków grzybów i roślin drzewiastych.
 mpietras@man.poznan.pl

Sklerocja – przetrwalniki tworzone przez grzyba *Cenococcum geophilum* w warunkach suszy

zmieniają się też ilościowe i jakościowe relacje w zbiorowisku grzybów oraz ich aktywność enzymatyczna, co może skutkować zmianą w ekologicznej funkcji, jaką pełnią poszczególne grzyby w zbiorowisku.

Do ostatniej kropli... wody

W dobie zmian klimatu największe zagrożenie dla wielu ekosystemów niesie za sobą wzrost temperatur i towarzyszące mu powiększanie się obszarów zagrożonych suszą. O tym, jak drzewa reagują na deficyt wody, możemy przekonać się na podstawie obserwacji gatunków ciężkonasiennych, czyli takich jak dobrze nam znany buk zwyczajny. Dotąd jego lata nasienne, na które przypadała obfita produkcja nasion, występowały co 5–8 lat. U drzew z całego kontynentu do „masowej produkcji” bukwi dochodziło w tym samym czasie. Obecnie mamy do czynienia z desynchronizacją tego zjawiska. Wysoka temperatura – a ta z każdym rokiem bije rekordy – stanowi dla drzew impuls do wytwarzania większej liczby nasion. Niezbędna im do tego energia nie jest jednak niewyczerpana. Bukom brakuje czasu na regenerację, wskutek czego wielkość produkcji nasion i ich jakość obniżają się. Fakt ten ma niebagatelne znaczenie dla gospodarki leśnej, wszak jeśli utracimy nasiona, w przyszłości stracimy również ekosystemy leśne w znanej nam dzisiaj postaci.

Gwałtowne zmiany warunków abiotycznych (fizykochemicznych elementów środowiska, w tym warunków atmosferycznych) wpływają na procesy fizjologiczne, w odpowiedzi na co drzewa ulegają wielu modyfikacjom – zarówno pod względem morfologii, fizjologii, jak i biochemii. Jeżeli zajrzemy głębiej – do wnętrza komórek – zaobserwujemy wiele reakcji służących roślinom jako formy samoobrony przed utratą życiodajnego związku wodoru z tlenem. Drzewa nie pozostają bierne wobec zagrożenia, jakie stanowi dla nich susza, lecz walczą – i to do ostatniej kropli... wody. Gdy w komórkach jej poziom się obniża, błona komórkowa zaczyna pękać i traci swoje

selektywne właściwości, co objawia się wiotczeniem pędów czy marszczeniem liści. Grupę substancji, dzięki którym możliwe jest utrzymanie potencjału wodnego przez komórki roślinne, nazywamy osmotitami, należą do niej m.in. prolina, mannitol, glukoza i fruktoza. Na szczególną uwagę zasługuje tu prolina – aminokwas produkowany i akumulowany w warunkach stresu. Jest to stan, który można określić jako stres organizmu przebiegający na poziomie molekularnym, polegający na zaburzeniu równowagi między produkcją związków uszkadzających komórki a zdolnością ich detoksykacji. Udowodniono, że prolina ułatwia wzrost siewek poddanych suszy, a także stabilizuje błony wewnątrzkomórkowe i białka błonowe, chroni je przed uszkodzeniami oksydacyjnymi. Związek ten hamuje również otwieranie się aparatów szparkowych, ograniczając tym samym transpirację, co nie jest bez znaczenia w sytuacji, gdy w otoczeniu brakuje wody.

Niedobór wody może pozostawiać swój ślad także na poziomie genetycznym. Najnowsze badania naukowe prowadzone w lasach Hiszpanii, Francji, Włoch, Niemiec i Szwecji potwierdzają, że zmieniające się warunki, takie jak susza czy podwyższona temperatura, wywołują zwiększenie różnorodności genetycznej między drzewami leśnymi (nawet rosnącymi tuż obok siebie), ta zaś pozwala im na szybsze adaptowanie się do zmiany klimatu. Naukowcy zidentyfikowali geny drzew odpowiadające za wiosenny rozwój liści, czas kwitnienia i odporność na suszę, a następnie udowodnili, że zmienność tych genów nie jest powiązana z pochodzeniem populacji, lecz z warunkami środowiska.

W czasie suszy zatrzymywaniu wody w organizmie sprzyja również wzmożona produkcja fitohormonów. To właśnie one stymulują takie reakcje fizjologiczne jak pojawienie się na naskórku rzęsek lub warstwy wosku ograniczających parowanie, hamowanie wzrostu pędów i jednoczesna stymulacja wzrostu korzeni, które dzięki temu szybciej docierają do zasobów wody zlokalizowanych w głębszych warstwach gleby. Ciekawą strategię, zwaną *cladopsis*, wykształciły różne gatunki dębów. Powstająca u nasady pędów warstwa odcinająca powoduje zmniejszenie światła naczyń drewna. Jeżeli poziom wody w glebie znacząco się obniży, wówczas pędy te odpadają. Wskutek tego zjawiska zmniejsza się ilość metabolicznie aktywnych, zużywających wodę tkanek, a główny szlak utraty wody przez transpirację zostaje odcięty.

Adaptacja drzew do warunków suszy jest też wspomagana przez żyjące z nimi grzyby. Już kilkadziesiąt lat temu badacze zauważyli zwiększoną odporność roślin, których korzenie były skolonizowane przez symbiotyczne grzyby, w porównaniu do roślin pozbawionych mykoryz. Jednak dopiero w ostatnich latach odkryto mechanizmy, które pomagają roślinom przetrwać okresy niedoborów wody. Drzewa rosnące w ekosystemach leśnych są „podłączone” do swojego „systemu wodociągów” tworzonego przez sieć

Ektomykoryzy tworzone przez grzyby z rodzaju *Tulasnella* na korzeniach sosny rosnących w skrajnie suchych warunkach boru chrobotkowego



MARIOŁA MATELSKA

grzybowych strzępek mogących transportować wodę na znaczne odległości. Korzenie drzew skolonizowane przez grzyby charakteryzują się też znacznie lepszym przewodnictwem hydraulicznym niż korzenie ich pozbawione. Grzyby stymulują rośliny do produkcji fitohormonów takich jak kwas jasmonowy i kwas abscysynowy, zwiększających przewodnictwo wody w tkankach roślinnych. Mogą też ingerować w procesy zachodzące w korzeniach roślin w znacznie większym stopniu. Przykładem na to jest dobrze nam znany muchomor czerwony, który oplatając drobne korzenie drzew, może wpływać na produkcję akwaporyn – białek odpowiedzialnych za tworzenie drobnych kanałków w półprzepuszczalnych błonach komórkowych, które umożliwiają transport wody między komórkami. Obecność strzępek wspomnianego muchomora we wnętrzu korzeni zwiększa znacząco ekspresję trzech z siedmiu genów odpowiedzialnych za syntezę akwaporyn. W ten sposób kolonizacja korzeni przez grzyba poprawia możliwości transportu wody w korzeniach.

Dostosować się, by przetrwać

Drzewa w trakcie ewolucji wykształciły wiele zdumiewających form adaptacji – również tych morfologicznych – umożliwiających przetrwanie suszy. Popularny przykład stanowi baobab, którego pękaty pień zbudowany z miększu wodnego jest w stanie pomieścić około 100 tys. litrów wody. Rosnące na afrykańskich sawannach akacje mają silnie zredukowane liście, a za aparat fotosyntetyczny służą im spłaszczone ogonki liściowe. Impulsem do wykształcania ciekawych rozwiązań bywa nie tylko niedostatek wody, lecz także... jej nadmiar. Korzenie wielu gatunków roślin po zalaniu wskutek powodzi lub wiosennych roztopów tracą możliwość oddychania i gniją. Nie dotyczy to jednak cypryśnika błotnego, który radzi sobie na podmokłych obszarach dzięki pneumatoforom, czyli nadziemnym korzeniom wyrastającym ponad poziom stagnującej wody, czyli zalegającej w bezruchu na danym obszarze. Twory te mają za zadanie doprowadzić powietrze do systemu korzeniowego drzewa. Podobne rozwiązania dotyczą gatunków występujących w lasach namorzynowych porastających wybrzeża w niemal całej strefie podzwrotnikowej, gdzie poziom wody zmienia się wraz z pływami morskimi. Bezpośrednie otoczenie przez wodę nie jest wyłączną przeszkodą do pokonania – drzewa potrafią to wykorzystać. Przykładów nie trzeba szukać daleko – wystarczy przyjrzeć się naszej rodzimej olszy lub brzozie. Nasiona drzew z tych rodzajów są zaopatrzone w cienkie „skrzydełka”, a ponadto ich powierzchnia jest słabo przepuszczalna dla wody, którą wykorzystują jako środek transportu. To zjawisko, nazywane hydrochorią, może jednak zniknąć, jeśli zniknie woda. I nawet jeśli brzozy i olsze w celu ekspansji skorzystają wówczas



KATARZYNA BRONEWSKA

z usług wiatru, nie sprawi to, że problem zniknie. Musimy pamiętać, że to właśnie drzewom zawdzięczamy glebowy rezerwuar wody. Na terenach pozbawionych tych pięknych, długowiecznych organizmów woda, zamiast zasilać tak bardzo potrzebne w czasie suszy podziemne zasoby, spływa do rzek i dalej, do mórz.

Cypryśnik błotny tworzący korzenie powietrzne, tzw. pneumatofory

Gdy zabraknie wody

Pięćset milionów lat wspólnej egzystencji umożliwiło roślinom i towarzyszącym im grzybom odnieść wielki ewolucyjny sukces. Życie w symbiozie pozwoliło na skolonizowanie większości lądów i powstanie ogromnej biologicznej różnorodności na kuli ziemskiej. Grzyby symbiotyczne, działając jako swoisty bufor przez zwiększenie odporności roślin drzewiastych na niekorzystne warunki, pomagają im adaptować się do nowego otoczenia. Migracja gatunków drzew związana ze zmieniającym się klimatem może być w dużej mierze uzależniona od rozmieszczenia odpowiednich dla nich gatunków grzybów mykoryzowych. Jako organizmy ewolucyjnie starsze grzyby wydają się odporniejsze na wpływ zmieniających się warunków. Ogromne bogactwo gatunkowe i możliwość bardzo szybkiej rekombinacji genów pozwalają im w bardzo krótkim czasie odpowiadać na zmiany zachodzące w środowisku. Jednak dla wszystkich grzybów symbiotycznych obecność związanych z nimi roślin stanowi warunek przetrwania. Dlatego też zarówno rośliny, jak i grzyby mogą być narażone na negatywne skutki globalnych zmian klimatu, szczególnie na długotrwałe susze występujące w okresie wegetacyjnym. Grzyby do pewnego stopnia są w stanie ograniczać negatywny wpływ deficytu wody na rośliny, jednak masowe zamieranie drzew obserwowane w ostatnich latach pokazuje, jak wielkie zagrożenie mogą stanowić dla nich zmiany klimatu. Kaskada zdarzeń uruchomiona w momencie, gdy rozpoczęło się zamieranie lasów, będzie miała katastrofalne skutki dla grzybów, a także dla ochrony różnorodności biologicznej na całej Ziemi. To właśnie dlatego tak istotna jest walka o każdą kroplę wody zatrzymaną w leśnym ekosystemie.